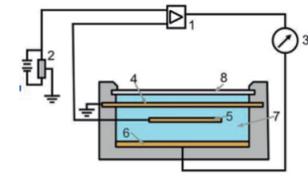
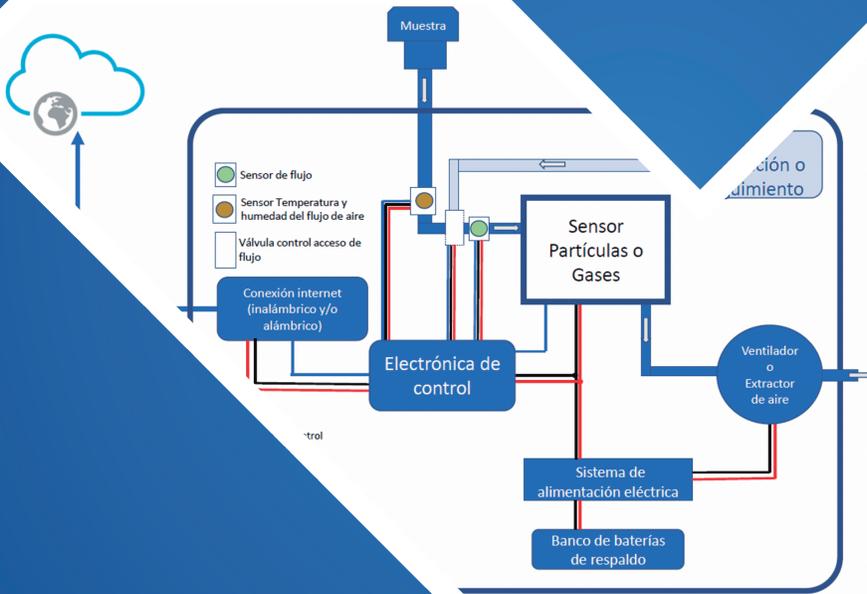




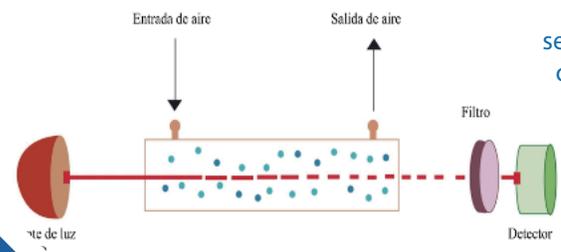
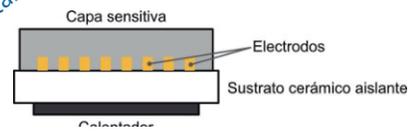
1

ESTADO DEL ARTE EN LA TECNOLOGÍA BASADA EN MICROSENSORES



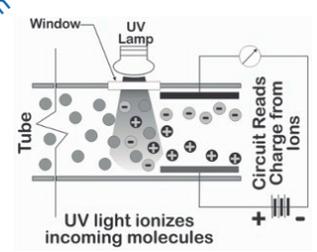
sensores electroquímicos

sensores de óxidos metálicos



sensores ópticos

sensores de fotoionización



*31 de Marzo del 2022
Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático,
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Ciudad de México.*

Informe del estado del arte en la tecnología basada en microsensores

Proyecto: EVALUACIÓN DE DISPOSITIVOS BASADOS EN MICROSENSORES PARA EL
MONITOREO CONTINUO DE LA CALIDAD DEL AIRE
SECTEI 190/2021

Armando Retama¹, Eugenia González del Castillo^{1,2}, Sandra Porras-Reza^{1,3},
Thania E. Arredondo-Palacios^{1,4}, Omar López-Antón^{1,2}, Michel Grutter^{1*}

¹ Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

² Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos, UNAM

³ Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM

⁴ Facultad de Ciencias, UNAM

* Responsable técnico del proyecto

Índice

Glosario	3
1. Introducción	5
1.1. Antecedentes	5
1.2. Sistemas de microsensores (S μ S)	6
1.3. Ventajas y desventajas de los S μ S	8
1.4. Principios de operación de los S μ S	9
1.4.1. Sensores electroquímicos	9
1.4.2. Sensores de óxidos metálicos	11
1.4.3. Detectores por fotoionización	12
1.4.4. Sensores ópticos	14
1.5. Integración de microsensores, almacenamiento y transmisión de datos	17
2. Evaluación y calibración	20
2.1. Procedimientos	21
2.2. Estudios previos	27
3. Aplicaciones de los Sistemas de Microsensores	29
4. Discusión	34
5. Referencias	36

Glosario

Airparif: Asociación francesa independiente encargada del seguimiento, análisis y peritaje, así como de alertas, información y formación en el ámbito de la calidad del aire, incluido el vínculo entre el aire, el clima y la energía en la Isla de Francia.

Aprendizaje automático: Conocido como *machine learning*, en inglés. Se refiere a una rama de la inteligencia artificial cuyo objetivo principal es permitir que las computadoras desarrollen el reconocimiento de patrones o la capacidad de aprender continuamente para realizar predicciones basadas en datos. Así, las computadoras son capaces de realizar ajustes sin haber sido programadas específicamente para ello.

AQ-SPEC: *Air Quality Sensor Performance Evaluation Center*, por sus siglas en inglés. Es un programa establecido por el Distrito de Gestión de la Calidad del Aire de la Costa Sur de California, cuyo objetivo es informar al público en general sobre el rendimiento real de los sensores de calidad del aire de "bajo costo" disponibles comercialmente realizando una caracterización exhaustiva en condiciones ambientales (campo) y controladas (laboratorio).

Calibración: Operación que establece, en una primera etapa, una relación entre los valores de medida y sus incertidumbres asociadas, con las correspondientes de un equipo de referencia con trazabilidad a un estándar. En una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación. (2.39 ISO/IEC GUIDE 99:2007 /2.39 NMX-Z-055-IMNC-2009)

Co-ubicación con equipo de referencia: En este documento, hace referencia a la situación en que los instrumentos a evaluar se encuentran midiendo en el mismo lugar que los equipos de referencia.

Deriva instrumental: Variación continua o incremental de una señal a lo largo del tiempo, debida a variaciones de las características metrológicas de un instrumento de medida.

DIY: Acrónimo del inglés *Do It Yourself*, que hace referencia a la práctica de fabricar o reparar objetos por uno mismo.

EuNetAir: Es una red europea cooperativa cuyo objetivo es explorar nuevas tecnologías de bajo costo para la detección y control de la contaminación del aire, a través de estudios de campo y experimentos de laboratorio.

Frecuencia de muestreo: Número de datos o muestras por unidad de tiempo.

Intercepto: Representa la media de una variable dependiente, en una regresión lineal, en ausencia de todas las variables independientes. Sirve para asegurar un modelo de regresión lineal insesgado.

Linealidad: La linealidad examina qué tan exactas son las mediciones en todo el rango esperado de mediciones e indica si el sistema de medición tiene la misma exactitud para todos los valores de referencia.

Microsensores: Un microsensor, como es referido en este documento, es un dispositivo pequeño capaz de recoger y transmitir información ambiental.

Normalizar: Proceso mediante el cual se hace que un valor se ajuste a una norma, una regla o un modelo común.

Pendiente: Coeficiente de una regresión lineal que relaciona la tasa de cambio entre las variables involucradas en un modelo.

Regresiones multivariadas: Método estadístico que permite establecer una relación matemática entre un conjunto de variables o factores independientes y una variable dependiente. Se utiliza cuando la variable dependiente es descrita o influenciada por varios factores o variables.

Regresiones no-lineales: Método estadístico utilizado para encontrar un modelo no lineal que relacione una variable dependiente y un conjunto de variables independientes, a través de relaciones arbitrarias entre las variables usando algoritmos de estimación iterativos.

RMSE: Raíz del error cuadrático medio. Medida de las diferencias entre los valores predichos por un modelo y los valores observados.

Sensores de bajo costo: En el programa AQ-SPEC se consideran como sensores de bajo costo todos aquellos cuyo costo de mercado sea inferior a \$2,000 USD.

Sesgo: Examina la diferencia entre la medición promedio observada y un valor de referencia. El sesgo indica cuál es la exactitud del sistema de medición cuando se compara con un valor de referencia.

S μ S: Sistema de microsensores.

US EPA: siglas en inglés de *United States Environmental Protection Agency*. Es una agencia ejecutiva independiente del gobierno federal de los Estados Unidos encargada de asuntos de protección ambiental.

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Típicamente, el estándar para medir la calidad del aire en exteriores con fines de prevenir a la población e implementar estrategias y políticas públicas para el mejoramiento de la calidad del aire, es utilizando redes de monitoreo en estaciones fijas con instrumentos de referencia. La información que éstas proveen es sin duda invaluable ya que los diferentes productos que se generan (bases de datos, reportes técnicos, artículos de investigación, etc.) han demostrado ser de gran utilidad en el seguimiento en implementación de las políticas públicas en todos los niveles (local, regional y global). A pesar de que el impacto de estas redes favorece a la sociedad al prevenirla de los riesgos latentes de tener una mala calidad de la calidad del aire, el alcance que tienen es limitado ya que la representatividad de las mediciones que se realizan en las estaciones que se operan por las diferentes entidades de gobierno, no ofrece el panorama completo del estado de la contaminación. Los altos costos tanto de los equipos como de su operación, no permiten tener el número suficiente de estaciones que puedan cubrir las diferentes áreas que pueden llegar a ser muy heterogéneas en cuanto a sus emisiones, sobre todo en áreas urbanas. Aunado a esto, las estaciones se limitan a medir en el mejor de los casos los contaminantes criterio, por ejemplo el ozono (O_3), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO_2) y el material particulado (PM). La normatividad establece que para la medición de estos contaminantes, se requiere implementar instrumentos certificados que cumplan con protocolos y procedimientos estrictos para el aseguramiento de calidad y exactitud de las mediciones. Otra desventaja que presentan las redes fijas de monitoreo atmosférico es que las tomas de muestra típicamente se encuentran sobre las azoteas, a una altura superior a la que se encuentre el aire al que la población está realmente expuesta.

En las últimas dos décadas, la miniaturización de componentes electrónicos, electrodos selectivos, dispositivos ópticos, y otros avances tecnológicos, ha permitido el desarrollo de sensores con una amplia gama de aplicaciones incluyendo el monitoreo de los contaminantes gaseosos y partículas en el aire (Clements et al., 2017). Debido a que estos sensores han sido poco sensibles a concentraciones bajas de los contaminantes del aire y se encuentran en fase de consolidación algunos de ellos, sus aplicaciones principales se reservaban a ambientes ocupacionales, la industria manufacturera, sistemas de extracción y purificación de aire, etc. El desempeño de los sensores ha mejorado con los años y gracias al potencial adquirido, se ha incrementado el número de aplicaciones por su facilidad para integrarse a los equipos de cómputo personales o micro plataformas como Arduino o Raspberry. Ésto también ha permitido a estudiantes, desarrolladores profesionales y aficionados integrar dispositivos funcionales para aplicaciones educativas,

recreativas, profesionales o comerciales. El costo de adquisición de estos sensores es significativamente menor que el de los equipos que tradicionalmente se utilizan en el monitoreo de la calidad del aire, por lo que suele referirse a ellos como **sensores de bajo costo** o **sensores baratos** (WMO, 2021), y por su relativo menor tamaño, son también llamados **microsensores**; este último término será el utilizado a lo largo de este informe.

El propósito de este documento es ofrecer una descripción de la situación actual de los sistemas que utilizan microsensores en aplicaciones relacionadas con el monitoreo de la calidad del aire. Describe sus principales características, principios de operación, aplicaciones, ventajas y desventajas, así como métodos de calibración. Ofrece también un resumen sobre los resultados de los estudios comparativos más importantes realizados en los últimos años, así como de campañas extensivas de monitoreo en centros urbanos importantes alrededor del mundo.

1.2. Sistemas de microsensores (S μ S)

Los dispositivos de bajo costo destinados al monitoreo de la calidad del aire se construyen conectando los microsensores a una plataforma para su control electrónico y el almacenamiento o transmisión de los datos, provista de una fuente de energía y un sistema de ingreso y desalojo de la muestra. Los componentes se instalan dentro de un armazón o contenedor, con un diseño que varía según la aplicación para la que se usará el dispositivo. Éstos pueden emplearse en múltiples aplicaciones, tanto educativas como profesionales, para el monitoreo en ambientes interiores, aire ambiente o el monitoreo móvil. Los dispositivos se pueden clasificar en función del costo, de la aplicación, del diseño, de la calidad de sus datos o del usuario objetivo. Su tamaño, bajo consumo de energía, versatilidad y costo, les confiere amplias ventajas para su uso en aplicaciones que requieren redes densas de monitoreo, para el monitoreo personal o su instalación en sitios con limitaciones de espacio y/o energía. Su principal desventaja se relaciona con la calidad de los datos, la dificultad de calibración y la falta de una normatividad adecuada para su construcción, uso y despliegue. En esta sección se describe con mayor detalle a los sensores y los sistemas construidos a partir de ellos.

A los sensores en sí mismos se les conoce como **sensores OEM** (por sus siglas en inglés; *Original Equipment Manufacturer*, Fabricante Original del Equipo). Los sensores OEM no pueden emplearse directamente, requieren integrarse a componentes de hardware/software para su uso, además de colocarse dentro de una caja acondicionada para la protección contra las condiciones meteorológicas. A los dispositivos que se ensamblan integrando en un sistema funcional a uno o más sensores OEM, un medio de muestreo, un sistema de alimentación eléctrica, hardware electrónico, software para la adquisición de datos, la conversión de señal analógica-digital, el tratamiento y la transferencia de datos, todo integrado en una caja protectora, se les denomina sistemas de sensores, **sistemas de microsensores (S μ S)**, dispositivos de sensores o dispositivos basados en microsensores (Karagulian et al., 2019b). Generalmente los S μ S se encuentran listos para su instalación y uso inmediato.

Los equipos empleados en el monitoreo de la calidad del aire pueden categorizarse en función de su aplicación principal y el tipo de usuario o consumidor. Los instrumentos empleados en las estaciones de monitoreo de calidad del aire tradicionales son altamente sensibles y de gran precisión, su operación está determinada por protocolos rigurosos y es posible establecer una trazabilidad en sus mediciones. Se emplean con propósitos regulatorios o de investigación científica. Generalmente tienen una certificación para su uso como Método de Referencia o Método Equivalente, sin embargo, suelen ser de costo elevado, además de requerir una instalación adecuada y personal especializado para su uso. A estos equipos se les conoce generalmente como **monitores de grado-regulatorio**, y serán referidos también a lo largo de este documento como equipos o dispositivos de referencia.

Aquellos monitores disponibles comercialmente que no cuentan con certificaciones, pero cuyos resultados son comparables con los obtenidos con equipos de grado-regulatorio, son típicamente de menor costo y pueden emplearse en aplicaciones que requieren datos de alta calidad. Estos monitores pueden considerarse como **monitores de grado-comercial** y están destinados para uso profesional o de investigación.

Los $S_{\mu}S$ son regularmente mucho más económicos, compactos, accesibles y de fácil uso e instalación. Son adecuados para aplicaciones que requieren de datos indicativos o donde la calidad final del dato no es crítica para el usuario. Estos sistemas son accesibles para el público en general y se consideran como **grado-consumidor**.

Por otra parte, el fácil acceso a los sensores OEM ha permitido que estudiantes, aficionados o usuarios no especializados ensamblen sus propios dispositivos con propósitos de enseñanza, sensibilización o de ciencia ciudadana. La proliferación del software de código abierto (OSS, *open source software*) y hardware de código abierto (OSH/OSHW, *open source hardware*) como las plataformas Arduino y Raspberry Pi, han facilitado la construcción de dispositivos **hágalo-usted-mismo (DIY, Do-It-Yourself)**, capaces de generar datos de calidad del aire para múltiples aplicaciones personalizadas (Ferdoush & Li, 2014).

En los monitores de grado-consumidor comerciales, el fabricante se encarga de la calibración previa de los sistemas, ofrece el servicio de soporte y mantenimiento de los equipos, además proporciona los medios para la descarga, almacenamiento, transformación, interpretación y despliegue de los datos. Los monitores operan como una “caja negra”, lo que puede representar un problema para los usuarios especializados (Lewis & Edwards, 2016). Comparativamente, la construcción de un monitor DIY suele ser más económica que los monitores comerciales, sin embargo, el uso de este tipo de sensores en aplicaciones que demanden un número importante de sensores o en proyectos de larga duración (por ejemplo, la construcción de una red densa o complementar una red de monitoreo) requiere de consideraciones importantes antes de iniciar para asegurar el éxito del proyecto, como lo detalla Chan et al. (2021). La figura 1 muestra el flujo de trabajo sugerido para la construcción de sistemas de sensores DIY para el monitoreo ambiental.

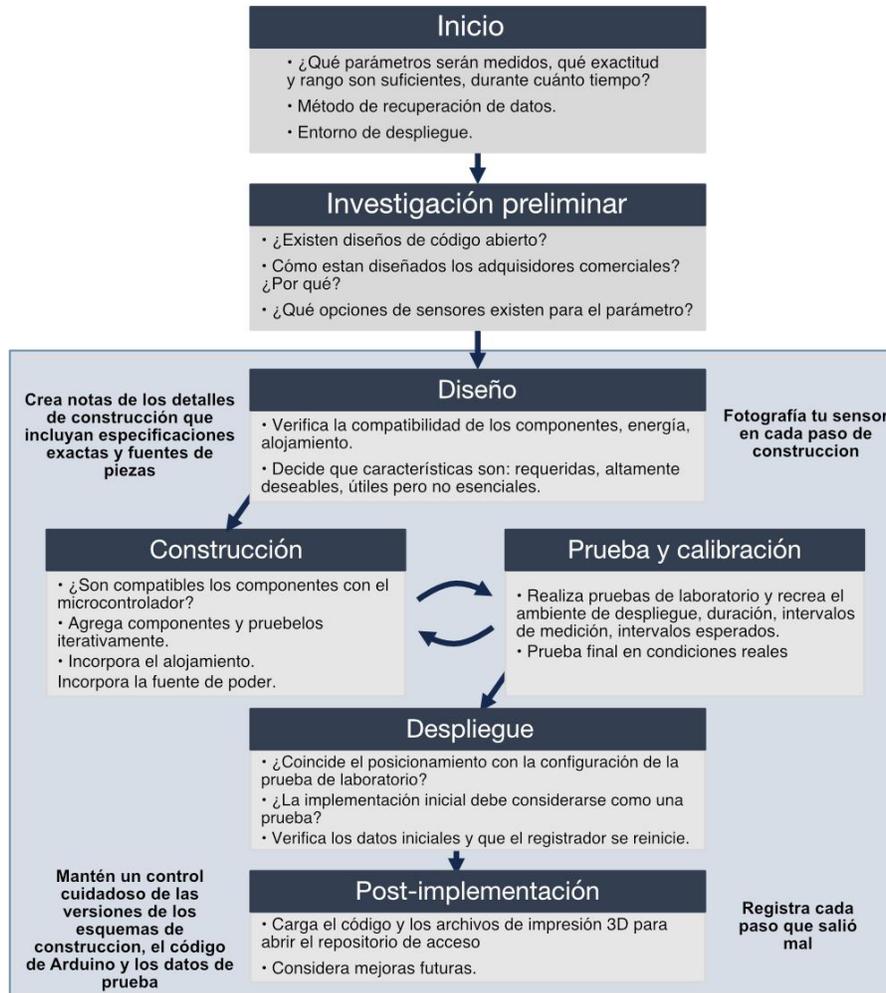


Figura 1. Esquema del flujo de trabajo propuesto por Chan et al. (2021) para el desarrollo de Sistemas de Microsensors basados en tecnologías de bajo costo y consideraciones clave en cada etapa.

1.3. Ventajas y desventajas de los S μ S

Las principales ventajas de los sistemas de microsensors incluyen su bajo costo de adquisición, el hecho de que son compactos, livianos, que tienen un menor consumo de energía y que son relativamente fáciles de operar en comparación con los instrumentos de grado-regulatorio o de referencia. Estas características les confieren un amplio potencial para aplicaciones en donde es difícil o imposible el uso de instrumentación de referencia. Alrededor del mundo los S μ S se han empleado con éxito en proyectos de ciencia ciudadana, comunitarios, educativos y de sensibilización, contribuyendo a la construcción de un sentido de propiedad de los problemas relacionados con la calidad del aire local o el cambio climático.

Actualmente, las autoridades ambientales se encuentran explorando otras posibles aplicaciones para estos dispositivos, como por ejemplo la densificación de los sistemas de monitoreo actuales, la identificación de fuentes críticas de emisión en escalas espaciales local y micro, la producción de datos para los modelos de escala urbana, la información y evaluación de las intervenciones públicas y las acciones de gestión. Para los investigadores, estos sistemas podrían ofrecer una ruta adicional para probar el conocimiento de los procesos atmosféricos, la dispersión y las emisiones, y contribuir a la validación de modelos y pronósticos atmosféricos a alta resolución temporal y espacial. En el estudio de los efectos en la salud, el uso de sensores portátiles con una alta resolución temporal puede proporcionar datos más detallados y representativos sobre la exposición personal (WMO, 2021).

A pesar de las evidentes ventajas de los sistemas de sensores, aún existen limitaciones que deben conocerse y evaluarse (Williams et al., 2018; Kaduwela & Wexler, 2021). Persiste una falta de información exhaustiva y accesible sobre el desempeño de los sensores, y la amplia oferta comercial dificulta la selección de los dispositivos más apropiados para aplicaciones que requieren datos de calidad para los usuarios gubernamentales o de investigación. La evidencia vigente ha demostrado que los dispositivos de bajo costo tienden a ser menos sensibles, menos precisos y químicamente menos selectivos para el contaminante de interés, en comparación con los métodos de referencia (Karagulian et al., 2019a, WMO 2021). Los sensores de bajo costo son susceptibles a las variaciones de la temperatura y humedad ambientales, y pueden presentar diferentes desempeños en diferentes mezclas de aire urbano por la presencia de interferentes (Castell et al., 2017). Adicionalmente, el envejecimiento del sensor demerita su desempeño (Borrego et al., 2018). Es un hecho que los sistemas de sensores no son actualmente un sustituto directo de los instrumentos de referencia, especialmente para fines regulatorios, ya que no alcanzan la misma calidad de datos, confiabilidad y longevidad que los instrumentos de referencia (WMO, 2021). Tampoco existen protocolos comunes para calibrar los sistemas de sensores, tanto del lado del fabricante como del usuario.

Se ha demostrado que es posible mejorar la calidad de los datos a través de la calibración en laboratorio y/o campo (Borrego et al., 2018), pero esta calibración debe realizarse sitio-por-sitio y por temporada climática (Morawska et al. 2018; Karagulian et al., 2019b). El resultado de la calibración es generalmente un modelo para mejorar la calidad de los datos del sensor; en ocasiones los algoritmos de calibración son muy complejos y pueden incluir variables predictoras no medidas por el propio sistema sensor.

1.4. Principios de operación de los S μ S

1.4.1. Sensores electroquímicos

En los sensores electroquímicos se produce una reacción con el gas de interés para producir una señal eléctrica proporcional a la concentración del gas. La configuración típica de un sensor

electroquímico tiene tres electrodos: un electrodo sensor o de detección (*sensing electrode*), un electrodo de referencia y un contraelectrodo. Los electrodos están rodeados por una fina capa de electrolito. El gas que entra en contacto con el sensor se difunde a través de una membrana de polímero sólido hidrofóbico que permite que reaccione la cantidad adecuada del gas en el electrodo de detección, mientras que evita que el electrolito se escape del sensor. La reacción resultante puede ser de oxidación o de reducción, esta reacción genera una corriente eléctrica entre el electrodo de referencia y el contraelectrodo, que es proporcional a la concentración del gas de interés. Debido a que se genera una corriente en el proceso a este sensor a menudo se le describe como un sensor de gas amperométrico. La figura 2 muestra un esquema de un sensor electroquímico.

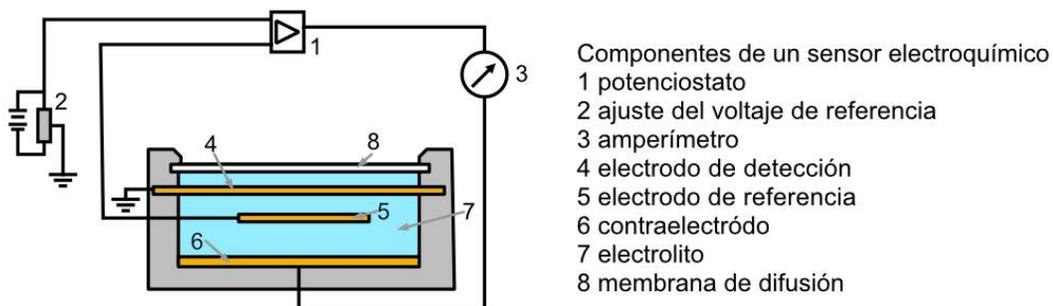


Figura 2. Esquema de un sensor electroquímico (adaptado de Spinelle et al., 2015).

Este tipo de sensores requieren de un voltaje de activación externo, ya que es importante mantener un potencial estable y constante en el electrodo de detección. Sin embargo, el potencial del electrodo de detección no permanece constante debido a la reacción electroquímica continua que tiene lugar en la superficie del electrodo. Esto provoca el deterioro del desempeño del sensor durante largos períodos de tiempo; para mejorarlo se introduce un electrodo de referencia, colocado dentro del electrolito, muy cerca del electrodo de detección. La función del electrodo de referencia es mantener un valor de voltaje fijo en el electrodo de detección cuando se aplica un potencial constante estable al electrodo sensor (potencial o voltaje de polarización). No fluye corriente hacia o desde el electrodo de referencia.

Los cambios externos de presión tienen un efecto mínimo en los sensores electroquímicos, sin embargo, los sensores electroquímicos son sensibles a los cambios de temperatura y la humedad relativa (WMO, 2021). Algunos sensores suelen tener compensación de temperatura interna, no obstante, durante su uso es recomendable mantener la temperatura de la muestra lo más estable posible. Los efectos de la temperatura y la humedad suelen depender del tipo de sensor y del fabricante.

Una consideración importante en el diseño de un microsensar electroquímico es su selectividad. Existen varias maneras de optimizar la respuesta de un microsensar a la especie gaseosa de interés:

las características de difusividad o porosidad de la membrana de entrada pueden ser ajustadas al gas objetivo (Spinelle et al., 2015), el material del electrodo sensor puede modificarse para catalizar o facilitar solo ciertas reacciones químicas, y el voltaje de polarización que se aplica al electrodo sensor puede controlarse para que favorezca sólo una reacción de oxidación o reducción del gas objetivo (Stetter & Li, 2008). De hecho, el control del potencial de polarización aplicado entre los electrodos sensor y de referencia constituye un medio efectivo de control tanto de la sensibilidad como de la selectividad de un microsensor electroquímico (Stetter & Li, 2008). A través de estos ajustes en su fabricación, un microsensor electroquímico puede desempeñarse de manera muy selectiva, particularmente en pruebas de laboratorio (Arroyo et al., 2021), sin embargo su uso en las complejas mezclas del aire urbano suele mostrar interferencias que no siempre están bien caracterizadas.

La esperanza de vida de un sensor electroquímico depende de varios factores, incluida la concentración del gas que se va a detectar, las características de la mezcla de aire y las condiciones ambientales en las que se utiliza el sensor. El envejecimiento del electrolito suele ser un problema que provoca una deriva en la respuesta del sensor. Generalmente, para este tipo de sensores se especifica una esperanza de vida de uno a tres años, sin embargo, esta puede ser mucho menor dependiendo de las condiciones ambientales y variar incluso en sensores de la misma marca y modelo.

Los sensores electroquímicos suelen emplearse para el monitoreo de ozono, dióxido de nitrógeno, formaldehído, acetaldehído, alcoholes, benceno y óxidos de nitrógeno.

1.4.2 Sensores de óxidos metálicos

Los sensores de óxido metálico son sensores de estado sólido que constan de uno o más óxidos de metales de transición, como óxido de estaño, óxido de aluminio, etc. Estos óxidos metálicos se preparan en forma de gránulos porosos o películas depositadas al vacío en un chip de sílice o de alúmina. Debido a que los sensores presentan diferentes respuestas al gas objetivo en diferentes intervalos de temperatura, utilizan un elemento calefactor para regular la temperatura. Este elemento calefactor puede ser un alambre de platino o de una aleación de platino, un óxido de metal resistivo o una capa delgada de platino depositado, el calentador es regulado por un circuito electrónico. La selección de la temperatura operativa adecuada para cada gas específico mejora la sensibilidad y la selectividad del microsensor. Sin embargo, en mezclas complejas de gases orgánicos e inorgánicos, como las encontradas en ambientes urbanos, es difícil evitar la interferencia cruzada. En la figura 3 se ilustran los componentes de un sensor de óxidos metálicos.

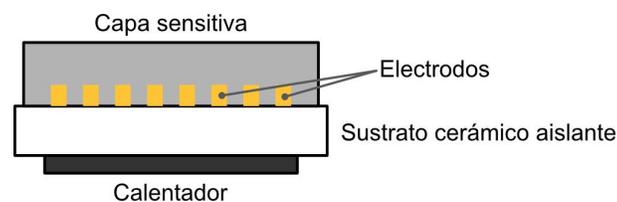


Figura 3. Esquema de un sensor de óxido metálico.

En presencia del gas, el óxido metálico hace que el gas se disocie en iones o complejos cargados, lo que provoca una transferencia de electrones. Un par de electrodos polarizados incrustados en el óxido metálico miden cualquier cambio en la conductividad o resistencia del material. Este cambio de conductividad o resistencia se mide como una señal eléctrica que es proporcional a la concentración del gas objetivo. Estos sensores pueden detectar una gran variedad de compuestos gaseosos. Para incrementar su selectividad se varían los materiales semiconductores, las técnicas de procesamiento y la temperatura de operación del sensor. En ocasiones, se depositan capas delgadas de otro metal u óxidos metálicos sobre la capa de detección para actuar como catalizador o filtro.

Los sensores de óxidos metálicos son susceptibles a los cambios de temperatura y humedad ambiental. Además, suelen presentar problemas de estabilidad en el largo plazo, por lo que requieren de una calibración constante (Spinelle et al., 2015). Otra desventaja es que la relación entre la concentración del compuesto y el cambio en la conductividad/resistencia suele no ser lineal.

Estos sensores suelen tener una mayor vida útil en comparación con los sensores electroquímicos, sin embargo, son más susceptibles a interferencias por otros gases. En algunas aplicaciones las interferencias se minimizan mediante el uso de materiales de filtrado apropiados que absorben todos los demás gases excepto el gas que se va a detectar. Suelen ser más baratos que los sensores electroquímicos, pero también su sensibilidad y desempeño es menor.

Los sensores basados en óxidos metálicos suelen emplearse en el monitoreo de ozono, compuestos orgánicos volátiles, acetona, alcoholes, acetaldehído, amoníaco, dióxido de azufre, ozono y monóxido de carbono.

1.4.3 Detectores por fotoionización

Los detectores por fotoionización (PID) son detectores de iones que emplean fotones de alta energía, normalmente en el rango ultravioleta (UV) para ionizar la mezcla de aire. La luz UV excita las moléculas, lo que provoca una pérdida temporal de electrones y la formación de iones cargados positivamente. El gas se carga eléctricamente y los iones generan una corriente eléctrica, que puede cuantificarse. Cuanto mayor sea la concentración del componente, más iones se generan y mayor es la corriente. Los iones se recombinan después de pasar el detector para regenerar las moléculas originales. Los PID son detectores poco selectivos ya que son capaces de ionizar todas

las moléculas con una energía de ionización menor o igual a la generada por la lámpara. La figura 4 muestra un esquema de funcionamiento.

La mayoría de los compuestos orgánicos volátiles (COV) se pueden detectar mediante PID, excepto los hidrocarburos de bajo peso molecular. La sensibilidad del sensor incrementa con la energía de la lámpara, mientras que la selectividad disminuye a medida que aumenta la gama de compuestos que se fotoionizan (Spinelle et al., 2015). La lámpara más común es la de kriptón (Kr, 10.6 eV) que tiene un equilibrio adecuado entre sensibilidad y selectividad. El tamaño habitual de estos sensores es de alrededor de 20 mm x 17 mm, con un peso de 8 g y un consumo de energía de 110 mW.

En aplicaciones muy específicas, las mediciones con estos sensores pueden ser comparables con equipos de gamas más altas y tienen tiempos de respuesta relativamente cortos. En el rango lineal del sensor es posible emplear factores de corrección para estimar las concentraciones de varios compuestos a partir de la calibración con solo un gas de calibración (e. g., isobutileno). Estos factores de corrección pueden determinarse en el laboratorio para mezclas de diferentes COV capaces de generar una respuesta a la energía de la lámpara.

Los PID tienen una pequeña dependencia de la temperatura y la humedad relativa, pero generalmente presentan desviaciones de linealidad, por lo que requieren de calibraciones frecuentes. La esperanza de vida de la lámpara es corta (<1 año) y cada cambio de lámpara requiere una recalibración del sensor. Una limitación importante de los PID es que no ionizan los COV con la misma eficiencia en todos los compuestos: algunos compuestos se ionizan de manera eficiente y permiten una buena detección, mientras que otros compuestos se ionizan de manera menos eficiente y la detección es pobre. Por lo tanto, la cuantificación de “COV totales” puede resultar poco exacta, ya que la concentración reportada es una función de la composición de la mezcla de COVs (WMO, 2021).

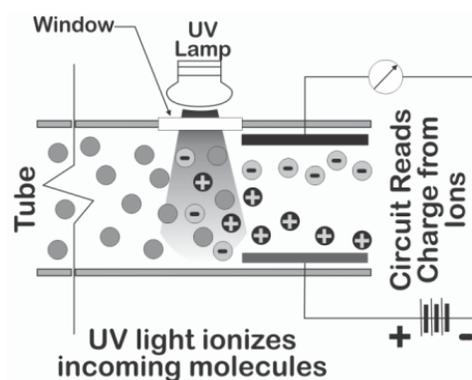


Figura 4. Esquema de funcionamiento de un PID (DHS Saver, 2013).

1.4.4. Sensores ópticos

Gases

Los métodos ópticos para la medición de gases o partículas presentes en la atmósfera, se basan generalmente en la atenuación de la luz al interactuar con una muestra de aire. En particular, para la medición de gases en la atmósfera, uno de los métodos más utilizados es el de infrarrojo no dispersivo (NDIR por sus siglas en inglés, *Non-Dispersive Infrared*). Esta técnica basa su funcionamiento en la absorción de luz infrarroja de acuerdo con las bandas de absorción del gas de interés y la Ley de Beer-Lambert, que establece una relación entre la concentración de una sustancia y la atenuación de luz. La absorción y emisión de radiación electromagnética por los gases ocurre a longitudes de onda específicas de acuerdo con su estructura atómica y molecular; esta interacción sólo puede tener lugar a frecuencias bien definidas, que son características de cada molécula.

Un sensor NDIR está compuesto por una fuente de luz infrarroja de banda ancha e intensidad conocida, una celda o cavidad donde se mantiene el gas a analizar, filtros de luz selectivos y un detector (ver figura 5). El gas a analizar se muestrea típicamente de forma activa mediante una bomba para reciclar la muestra dentro de la celda (Keimel, 2019). La fuente de luz emite un haz que es absorbido y atenuado por el gas de interés en la celda de medición, e incide finalmente sobre el detector; la diferencia entre la intensidad emitida y la detectada es proporcional a la concentración del gas absorbente en la celda de medición (Szczyrek, 2011). La luz que atraviesa el detector llega a un filtro de interferencia que permite su paso en una banda de longitud de onda característica del gas de interés. Un detector detrás de este filtro determina la cantidad de luz que no fue absorbida por las moléculas o por el filtro y lo compara con la intensidad de la fuente de luz inicial. Esta relación proporciona una indicación de la concentración del gas de interés presente (Keimel, 2019).

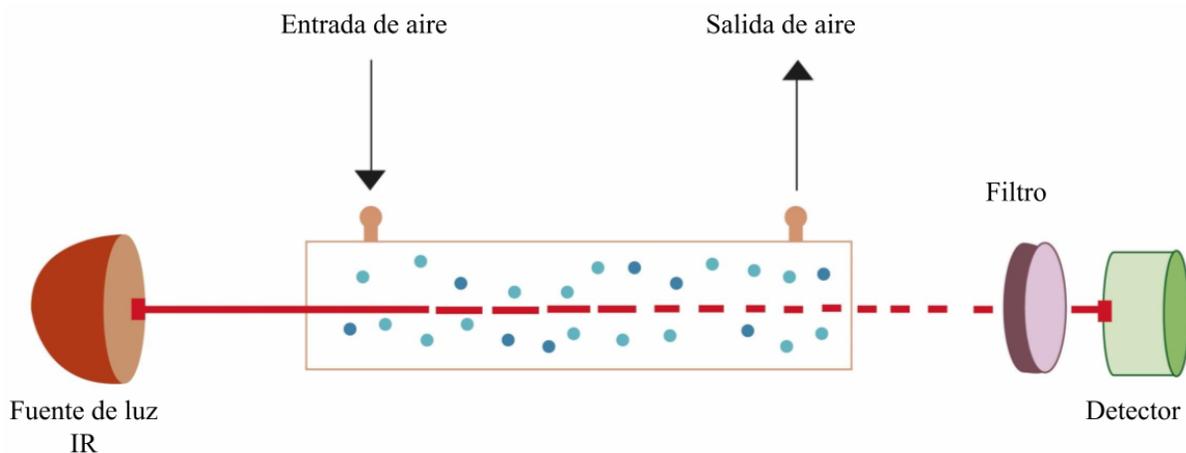


Figura 5. Esquema de un sensor NDIR para gases.

Las fuentes de error en esta técnica, están asociadas principalmente a: 1) la interferencia causada por otros gases dentro de la muestra, 2) las variaciones en la intensidad de la fuente de luz, 3) la temperatura de la fuente, 4) cambios en la respuesta de longitud de onda del detector e incluso polvo sobre los componentes ópticos de los sensores (Torvela, 2013). Así mismo, los sensores NDIR pueden ser sensibles a valores de temperatura, presión y humedad, por lo que requieren una adecuada calibración, que por lo general se realiza con sensores de referencia.

Partículas

En comparación con la medición de gases usando microsensores, la medición de partículas suspendidas suele presentar un mayor número de retos. La compleja naturaleza de los aerosoles suele afectar el desempeño de los sensores. Las técnicas empleadas en la estimación de la concentración de la masa de las partículas suelen utilizar métodos ópticos basados en la dispersión de la luz, empleando una fuente de luz de baja potencia, que puede ser un LED o un láser, y un detector de fotones para medir la luz dispersada por las partículas.

Los sensores de bajo costo disponibles no miden directamente la masa de las partículas, cuantifican alguna propiedad (i. e., dispersión de la luz) de las partículas para transformarla posteriormente a masa. Los dispositivos de medición comúnmente empleados incluyen a los nefelómetros, que miden la dispersión de la luz de las partículas presentes en los aerosoles; y a los contadores ópticos de partículas (COP), que contabilizan el número de partículas en función de intervalos de tamaño. Estos últimos tienen una mayor proliferación en el mercado.

En la mayoría de los COP, una bomba o ventilador impulsa un flujo de aire hacia una región iluminada por un haz enfocado de luz, en donde ocurre la detección (ver figura 6). La fuente de luz suele ser de banda ancha (luz blanca) o monocromática (empleando un láser o LED) (Salimifard et al., 2020). A medida que las partículas avanzan a través de la región de detección, dispersan la luz a diferentes velocidades según su tamaño, forma y longitud de onda de la luz (Bohren & Huffman, 2004). La cantidad dispersada se detecta en un intervalo específico de ángulos y se traduce en un pulso electrónico. La intensidad del pulso electrónico se convierte en tamaño de partícula utilizando la teoría de Mie (Hinds, 2012). El número de partículas se reporta agrupado en intervalos discretos de tamaño o *bins*. Posteriormente, se transforma en masa a través de relaciones empíricas con aerosoles de tamaño y masa conocidos.

A pesar de que los contadores ópticos tienen un principio de funcionamiento similar, pueden presentar diferencias en la longitud de onda de la fuente de luz, el ángulo de detección de dispersión y la cantidad de *bins*. La mayoría de los sensores comerciales utilizan un flujo activo, sin embargo, existen versiones que emplean métodos de muestreo pasivo como la convección natural.

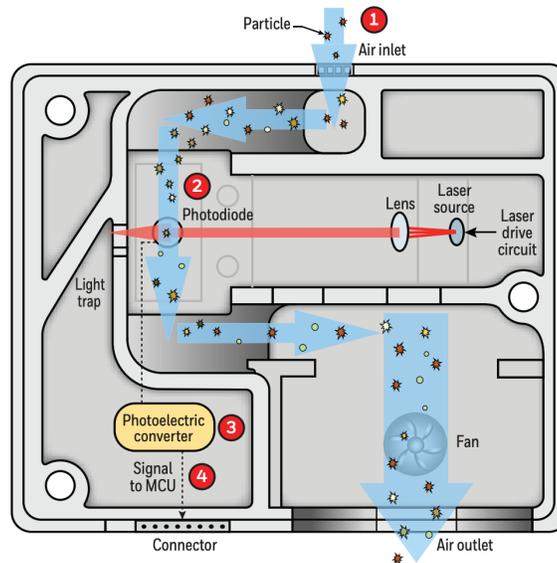


Figura 6. Esquema de un sensor óptico para PM (Imagen: <https://help.atmotube.com/technical/3-atmotube-pm/>).

Los microsensores ópticos tienen limitaciones importantes que deben conocerse antes de considerar su uso para algunas aplicaciones específicas. Los contadores ópticos no suelen identificar partículas con tamaños menores a ~ 300 nm, típicos de las partículas emitidas por los vehículos a gasolina, ni mayores a $10,000$ nm, asociadas con la resuspensión del polvo y tolvaneras. Los límites de detección relativamente altos (1 a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) los hacen poco aptos para sitios con bajas concentraciones de partículas, mientras que el valor del límite superior de la medición que se encuentra entre 500 a $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ los hace inadecuados para sitios con altos niveles de contaminación.

Las propiedades de los aerosoles tienen una importante influencia en la medición con los microsensores ópticos. El contenido de humedad en las partículas puede modificar su tamaño, debido a que la higroscopicidad depende de la composición del material presente en los aerosoles y a los cambios de humedad en el aire ambiente; la compensación del efecto de la humedad, por lo tanto, es un reto (Jayaratne et al., 2018). Por otra parte, las diferencias en el índice de refracción y los coeficientes de absorción y dispersión de los materiales que forman las partículas pueden provocar diferencias en la cantidad de luz dispersada por unidad de masa, esto es un problema cuando la composición de los aerosoles se modifica durante el día por la transformación secundaria o los patrones de emisión de las fuentes (Crilley et al., 2020). Los microsensores generalmente son calibrados por el fabricante en condiciones de laboratorio, empleando aerosoles de tamaños y propiedades ópticas conocidas que poco se parecen a los que se pueden encontrar en el aire ambiente, en consecuencia, cuando se emplean en condiciones reales en los ambientes urbanos suelen presentar desempeños diferentes que dependen fuertemente de las características locales de los aerosoles.

La compensación de los efectos de la humedad y la composición en las mediciones con los sensores ópticos es un reto que debe abordarse sitio por sitio. La corrección puede realizarse de manera gruesa comparando las mediciones contra un equipo de referencia para definir un factor de corrección por sitio y temporada climática, o emplear una aproximación más refinada empleando información disponible sobre las propiedades fisicoquímicas de los aerosoles locales.

El depósito gradual de partículas dentro de la cámara óptica puede provocar una deriva en la respuesta del sensor en el mediano o largo plazo. La presencia de insectos o telarañas dentro de la cámara óptica puede modificar severamente la respuesta del sensor. Algunos sensores utilizan un pequeño ventilador de baja potencia para conducir la muestra hacia la cámara óptica, pero estos ventiladores no tienen la capacidad necesaria para lidiar con partículas grandes y pesadas, como el polvo, por lo que son poco apropiados para la medición de partículas gruesas ($>2.5 \mu\text{m}$).

La vida útil de los sensores ópticos suele ser de 1 a 3 años dependiendo de la carga de partículas en el sitio de medición. Sin embargo, algunos fabricantes afirman que la esperanza de vida puede ser de hasta 5 años en operación.

1.5. Integración de microsensores, almacenamiento y transmisión de datos

Para la construcción de un dispositivo funcional los microsensores se conectan a una microcomputadora fabricada *ex profeso*, una microcomputadora de formato compacto (e. g., Raspberry Pi) o una plataforma de creación electrónica (e.g., la placa Arduino). La microcomputadora provee la energía al sensor y recibe la salida de datos. Dependiendo de la aplicación y el tipo de microsensores se pueden agregar periféricos como una fuente de energía, componentes para la transmisión y/o almacenamiento de datos, un sistema de flujo y/o acondicionamiento de la muestra, todos ellos montados dentro un contenedor o caja para su protección.

Los microsensores pueden transmitir los datos de salida por vía analógica o por comunicación serial a un dispositivo maestro o de control. En la transmisión analógica, la información es transferida a través de un voltaje variable entre dos dispositivos electrónicos. Las señales analógicas son de tipo continuo, es decir, es una señal variable en el tiempo donde la cantidad que representa varía con el tiempo. El dispositivo receptor de la información requiere de un convertidor para transformar las variaciones de voltaje en información digital.

Los protocolos de comunicación serial más comunes en los microsensores son UART, I²C, SPI. A continuación se describe cada uno de ellos.

- El protocolo **UART** (siglas para *Universal Asynchronous Reception and Transmission*) es un protocolo de comunicación serial simple que permite que el host se comunique con el dispositivo auxiliar, admitiendo transmisión de datos bidireccional, asíncrona y en serie. Puede operar en tres modos: *Simplex*, con transmisión en una dirección; *Half-duplex*, con transmisión no simultánea en cualquier dirección; y *Full-Duplex*, con transmisión

simultánea de datos en ambas direcciones. Es un protocolo que se encuentra bien documentado, simple de operar, no necesita reloj y la paridad de bits se puede usar para la verificación de errores. Las principales desventajas incluyen un tamaño de trama limitado a 9 bits, no utiliza sistemas múltiples de maestros y esclavos, y tiene bajas velocidades de transmisión de datos.

- El bus **I²C** (siglas para *Inter-Integrated circuit*) es un bus del tipo serial síncrono bidireccional que puede soportar hasta 128 dispositivos subordinados sin deterioro en la comunicación. Admite comunicaciones multimaestro y multiesclavo, y es adaptable a muchas aplicaciones. Utiliza reloj para el control de la señal. Dentro de sus principales desventajas se encuentran una velocidad más lenta, tiene un diseño de “drenaje abierto” (que significa velocidad limitada), requiere más espacio en el PCB (*printed circuit board*), el diseño y control se complica a medida que se incrementa el número de dispositivos.
- El protocolo **SPI** (siglas en inglés para *Serial Peripheral Interface*) es parecido al I²C y es un protocolo de comunicaciones serial diseñado especialmente para la conexión de microcontroladores. Opera enviando y recibiendo datos simultáneamente, tiene velocidades altas de transmisión de datos y opera de manera síncrona. El protocolo SPI es simple y más rápido en comparación con UART e I²C. Las principales desventajas incluyen el uso de más puertos limitando la cantidad de dispositivos, no especifica ningún control de flujo y ni confirmación de la recepción de los datos como en el I²C, solo se pueden utilizar un dispositivo maestro.

Algunos microsensores pueden utilizar un puerto USB (siglas para *Universal Serial Bus*) para la transmisión de datos, sin embargo, no es tan común ya que requiere de hardware especializado y generalmente se utiliza en la transmisión de grandes volúmenes de datos (e. g. transmisión de imágenes).

Dependiendo del diseño del dispositivo y la aplicación, los datos pueden almacenarse localmente (en el dispositivo) o transmitirse vía alámbrica (serial o Ethernet), o inalámbrica (WiFi, Bluetooth, LoRa o LoRaWAN). Para el almacenamiento local se puede utilizar una EEPROM, si se trata de pequeñas cantidades de datos, o un periférico de almacenamiento (e. g., tarjetas SD, micro SD, memorias USB) para volúmenes mayores. El almacenamiento local se utiliza en aplicaciones que requieren de un respaldo físico de los datos o que carecen de acceso a algún medio de comunicación alámbrica o inalámbrica. El almacenamiento por vía alámbrica requiere de infraestructura adicional, como una computadora conectada al dispositivo o un cable Ethernet conectado a un nodo de red, es funcional para el monitoreo en interiores, pero es poco práctico cuando la aplicación requiere que el dispositivo se utilice en aplicaciones móviles, monitoreo personal, monitoreo en exteriores o en localidades remotas. El uso de la comunicación Bluetooth suele limitarse para el almacenamiento inalámbrico de los datos en dispositivos cercanos al sensor, como computadoras, teléfonos celulares y tabletas. Suele tener aplicaciones limitadas al monitoreo personal, en interiores y móvil. El almacenamiento en la nube es la opción preferida en la mayoría de los dispositivos comerciales. El envío de los datos puede realizarse vía Ethernet o WiFi. Muchos fabricantes ofrecen herramientas adicionales para la visualización, comparación y descarga de los

datos, sin embargo, en algunos casos los usuarios no tienen la propiedad de los datos, los datos pueden pasar por algún proceso de validación o procesamiento, o incluso podría haber cargos adicionales por el uso de la nube.

La energía para la operación del dispositivo puede provenir de un panel solar, una batería o de la conexión a un contacto eléctrico. La fuente de energía generalmente depende de la aplicación del dispositivo, por ejemplo, los dispositivos de monitoreo personal requieren de una batería para su operación, mientras que un equipo para monitoreo en interiores puede utilizar batería o conectarse directamente al sistema eléctrico del hogar.

Los sensores electroquímicos o de óxidos metálicos son pasivos y pueden exponerse directamente al aire ambiente, por lo que es recomendable que estén protegidos adecuadamente de la lluvia y el polvo. Los contadores ópticos para el monitoreo de aerosoles incluyen un ventilador de baja potencia para conducir la muestra dentro de la cámara óptica. Los sensores NDIR y PID podrían requerir de un sistema neumático que garantice un flujo continuo de muestra para su análisis. El uso de bombas de vacío en un sistema de microsensores puede incrementar el consumo de energía y elevar la temperatura en el interior.

Algunos dispositivos pueden incluir ventiladores para mantener el sistema a una temperatura relativamente constante, desalojar la muestra de aire o enfriar los componentes electrónicos. Pero el uso de ventiladores puede incrementar la demanda de energía.

Algunos dispositivos más complejos pueden integrar una válvula solenoide que alterne el ingreso de la muestra atmosférica con el uso de uno o más tanques de mezcla gaseosa de concentración conocida, como estrategia de calibración o de seguimiento del desempeño del sensor (Arzoumanian et al., 2019). La hora y duración del paso de la mezcla conocida, e incluso la incorporación de los resultados de la calibración al procesamiento de los datos puede automatizarse.

Finalmente, la caja o contenedor protege a los diferentes componentes contra la lluvia, la radiación solar y el polvo. Dependiendo de la aplicación se recomiendan cajas tipo NEMA4 o IP55, construidas con materiales no conductores, ligeros y resistentes. La configuración exterior del contenedor puede personalizarse para brindar estética y funcionalidad al dispositivo.

La figura 7 muestra un esquema generalizado de un sistema de microsensores que incorpora los componentes periféricos descritos.

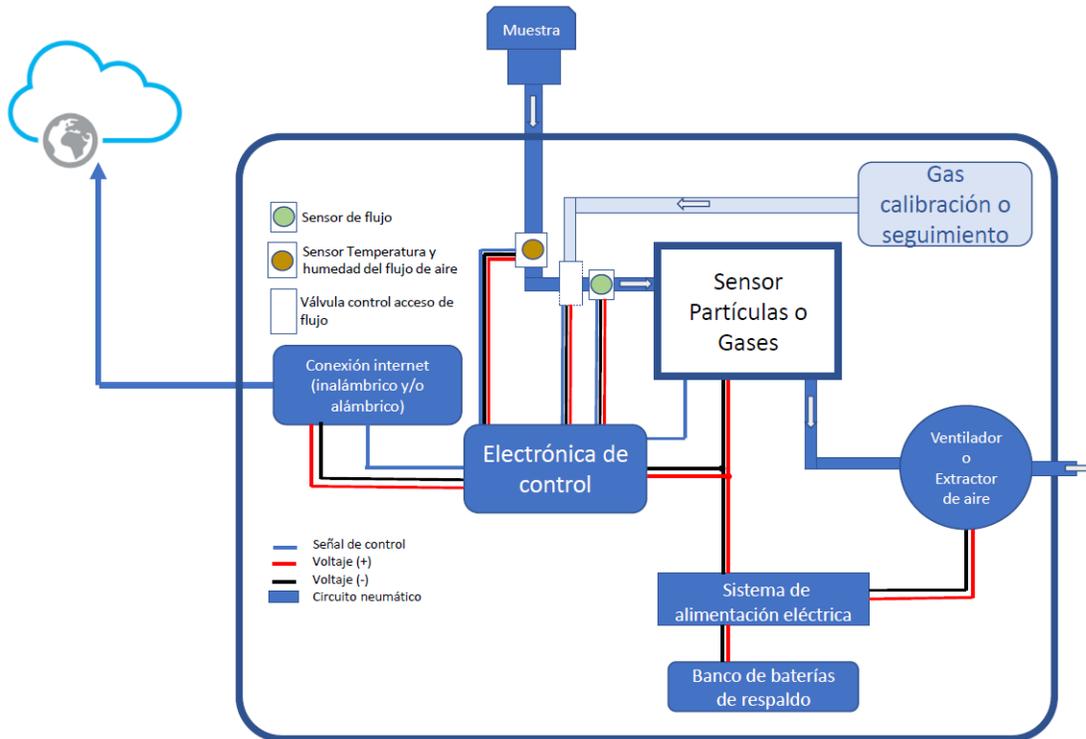


Figura 7. Esquema general de los componentes principales de un sistema de microsensores. El uso de una mezcla gaseosa de calibración o seguimiento se muestra en azul claro por ser muy poco frecuente su incorporación en un μ S.

2. Evaluación y calibración

Los μ S ofrecen la posibilidad de ampliar considerablemente el número de sitios y condiciones de medición de la calidad del aire en las ciudades, y diversificar los grupos e individuos que producen y comunican esta información a la ciudadanía. A pesar de sus numerosas ventajas, se ha documentado una alta variabilidad en la calidad de las mediciones que producen estos sistemas de sensores (e.g. Borrego et al., 2016). Existen limitaciones inherentes al bajo costo y a su relativo menor tamaño comparado con el de los tradicionales equipos de referencia. Entre tales limitaciones se encuentran una mayor sensibilidad a especies químicas distintas al objetivo de medición, mayor deriva o cambio en la sensibilidad u otra característica de la medición, mayor variación en los datos reportados por sensores individuales del mismo modelo, etc. (Karagulian et al., 2019). Con la incorporación de estos sistemas de microsensores a las capacidades de monitoreo de la calidad del aire en diversas aplicaciones, surge la necesidad de una evaluación de su desempeño en un rango apropiado de condiciones atmosféricas, la caracterización del cambio en el tiempo de los datos que proveen (deriva instrumental), y su comparación contra las mediciones producidas por equipos de referencia.

2.1. Procedimientos

Los procedimientos de evaluación de los sistemas de microsensores pueden clasificarse en dos tipos: **pruebas de campo** y **pruebas de laboratorio** (Duvall et al., 2021).

Evaluación de campo

Antes del inicio de las pruebas de campo, algunos protocolos incluyen una **evaluación de gabinete** que consiste en la revisión de la documentación del sensor y sus requerimientos técnicos, la verificación de la capacidad de almacenamiento local o remota de los datos producidos, la revisión del formato de salida de los datos, y la comprobación de la recuperación del sensor tras una falla en el suministro eléctrico o de baterías.

La evaluación de campo propiamente dicha consiste en la **co-ubicación de los sensores bajo evaluación junto a un equipo de referencia** durante cierto periodo. Los equipos son expuestos a la intemperie, bajo condiciones atmosféricas en todo idénticas a las que se somete a la referencia (e.g. Polidori et al., 2017; Lewis et al., 2018; Duvall et al., 2021). En la tabla 1 se clasifican algunos de los equipos de referencia más utilizados por tipo de contaminante.

La ubicación geográfica de los sitios de evaluación suele estar determinada por la localización de los equipos de referencia disponibles para las pruebas, que generalmente se encuentran en estaciones de monitoreo de calidad del aire pertenecientes a agencias gubernamentales, organismos regulatorios o centros de investigación científica. En cualquier caso, el equipo de referencia deberá estar manejado bajo los protocolos de trazabilidad y gestión de calidad vigentes localmente. Dependiendo de la aplicación a la que estén destinados los equipos de referencia, el sitio de pruebas puede ubicarse cercano a fuentes específicas de contaminantes, alejado de ellas para reportar condiciones ‘de fondo’ (*background*) o una mezcla de tales circunstancias (Polidori et al., 2017; AIRLAB, 2021). En general, es deseable que el sitio de evaluación ofrezca un rango amplio de condiciones ambientales de temperatura, humedad relativa y concentración de los contaminantes de interés.

Tabla 1. Equipos de referencia empleados comúnmente en redes de monitoreo.

Parámetro	Técnicas o principios de operación	Equipos de grado de referencia (ejemplos)
PM ₁₀ , PM _{2.5}	Gravimetría, atenuación de radiación beta, contadores ópticos	TEOM (Thermo Scientific) BAM 1020 (MetOne) T640 (Teledyne-API)
O ₃	Quimioluminiscencia, fotometría UV	T400 (Teledyne-API) 49i (Thermo Scientific) Serinus 10 (Ecotech)

NO ₂ , NO	Quimioluminiscencia, CAPS	T200 (Teledyne-API) N500 (Teledyne-API) AS32M (ENVEA) 42i (Thermo Scientific) Serinus 40 (Ecotech)
CO	Absorción en el infrarrojo, NDIR y Espectroscopía de Extinción en Cavidad Anular (CRDS, por sus siglas en inglés)	T300 (Teledyne-API) 48i (Thermo Scientific) Serinus 30 (Ecotech) G2401 (Picarro Inc.)
SO ₂	Fluorescencia UV	T100 (Teledyne-API) 43i (Thermo Scientific) Serinus 50T (Ecotech) AF22e (ENVEA)
CO ₂	Espectroscopía de Extinción Anular en Cavidad (CRDS, por sus siglas en inglés)	G2401 (Picarro Inc.)
COV	Cromatografía de gases	Por ejemplo el <i>Ozone Precursor System</i> de Perkin Elmer

Otras consideraciones durante la co-ubicación de sensores a prueba y equipo de referencia son las siguientes (Lewis et al., 2018; AIRLAB, 2021; Duvall et al., 2021):

- Es deseable contar con al menos tres equipos idénticos por fabricante y modelo a evaluar, tanto en previsión de la pérdida de funcionamiento de uno de ellos durante las pruebas, como para estimar la precisión o repetibilidad de las mediciones entre sensores individuales de una misma marca y modelo.
- Los equipos bajo evaluación deben posicionarse a no más de 10 m de distancia del equipo de referencia; las tomas de aire deben ubicarse a la misma altura que la de éste.
- Debe asegurarse un suministro constante y suficiente de corriente eléctrica para todos los equipos que así lo requieran.
- Todos los equipos deben estar posicionados de modo que estén expuestos a iguales condiciones meteorológicas, cuidando que ninguno de ellos reciba menor cantidad de radiación, viento, o se encuentre en condiciones distintas de temperatura y humedad relativa.
- Debe asegurarse un flujo de aire irrestricto, libre de obstrucciones para las tomas de todos los equipos, aún si éstos se encuentran resguardados en un abrigo meteorológico.
- Es necesario proteger todos los equipos del ingreso y actividad de insectos, arañas y otros animales.

Debe contarse con una bitácora donde se asiente detalladamente cualquier interferencia (interrupciones de corriente, reemplazo de consumibles, periodos de mantenimiento, visitas de inspección, etc.) o evento meteorológico extremo durante el periodo de evaluación.

Frecuencia de muestreo y duración de la evaluación

Una vez co-ubicados los equipos a evaluar y el de referencia, debe elegirse o programarse en los sistemas de microsensores una **frecuencia de muestreo igual o mayor a la que reporta el equipo de referencia**, si tal opción se encuentra disponible, y promediar las mediciones en periodos iguales a la frecuencia de reporte del monitor de referencia. La duración del periodo de muestreo debe considerar dos aspectos: 1) ser suficiente para evaluar la **deriva instrumental**, o cambio en el tiempo en la sensibilidad u otra característica de la medición de los sistemas de microsensores, y 2) incluir suficiente variación ambiental y en los niveles del contaminante de interés y de posibles interferentes para que la evaluación sea lo más completa posible (Lewis et al., 2018; AIRLAB, 2021; Duvall et al., 2021).

Métricas de evaluación

Los datos colectados por los sistemas de microsensores y los datos de referencia son colectados durante un periodo de duración variable, y comparados posteriormente por medio de un conjunto de métricas estadísticas. Estas métricas abordan aspectos como la repetibilidad de las mediciones entre sensores individuales, su grado de cercanía con respecto a lo reportado por el equipo de referencia, su evolución en el tiempo, y la respuesta que muestran a cambios ambientales de temperatura, humedad relativa, niveles de contaminantes, etc. Las métricas más comunes de evaluación y sus definiciones se resumen en la tabla 2 y se explican más adelante en el contexto de los procedimientos de calibración.

Tabla 2. Métricas comúnmente empleadas para evaluar el desempeño de los S_μS.

Métrica	Descripción
Disponibilidad de datos	- Presencia: fracción de mediciones adquiridas de todas las teóricamente posibles.
Precisión	- Desviación estándar de los promedios de 24 h de cada dispositivo individual con respecto del promedio general para todos los dispositivos del mismo tipo en el mismo periodo. - Coefficiente de variación (CV): cociente entre la desviación estándar (arriba) para un tipo de dispositivo y la media de las mediciones para todo el periodo de prueba de todos los dispositivos del mismo tipo.
Sensibilidad / Sesgo	- Intercepto y pendiente de la recta de regresión de promedios de 24 h del microsensor vs. referencia
Linealidad	- Coefficiente de determinación (R²) de recta de regresión de promedios de 24 h del microsensor vs. referencia. - Coeficientes de correlación (ρ de Pearson, τ de Kendall, coeficiente de Spearman) entre los valores del microsensor y la referencia.
Error	Raíz del error cuadrático medio (RMSE), raíz normalizada del error cuadrático medio (nRMSE).
Efectos meteorológicos de temperatura (T), humedad relativa (RH) y punto de rocío (PR)	Exploración gráfica de: - Promedios de 24 h normalizados para cada sensor (promedio sensor/promedio referencia) vs. promedios de 24 h de T, RH, PR. - Diferencia absoluta entre promedios de 24 h del sensor y de la referencia vs. promedios de 24 h de T, RH, PR.
Deriva	- Exponer los sensores por varias horas a niveles bajos y medios de concentración del contaminante, a T y RH controladas. Posteriormente, medir niveles atmosféricos durante 60 días y repetir la exposición. Comparar la respuesta inicial y final (Lewis et al. 2018).

Calibración

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) considera tres niveles ascendentes de calidad y confiabilidad de los datos reportados por un sistema de microsensores (Lewis et al. 2018). El nivel inferior es el de **comparación** con sensores de referencia cercanos para validar que los datos producidos por el microsensor son razonablemente cercanos en rango y sensibilidad comparados con la referencia. Ésta última puede ser una medición satelital, un equipo trazable, o el producto de un modelo. El siguiente nivel es el resultado de un ejercicio de **co-ubicación** con equipo de referencia (lado-a-lado), descrito anteriormente. Y el nivel de gestión de calidad que produce datos más confiables implica una **calibración**, que consiste en encontrar una relación estadística o

determinística entre los datos producidos por el sistema de microsensors y el estándar de referencia conocido, bajo condiciones de campo o laboratorio. El sistema de referencia puede consistir en un instrumento o sistema trazable, o en materiales de referencia, como una mezcla gaseosa de composición conocida, por ejemplo. La co-ubicación de los microsensors con el instrumento de referencia bajo condiciones ambientales es un procedimiento efectivo para encontrar los parámetros de dicha relación de calibración, y en este sentido las consideraciones y métricas mencionadas anteriormente para una evaluación de sensores mediante co-ubicación con una referencia aplican igualmente para un ejercicio de calibración.

Regresión lineal

La herramienta estadística más común para encontrar una ecuación que relacione los valores producidos por un microsensor y un equipo de referencia es la regresión lineal, a través de la cual se determinan los coeficientes de **pendiente** e **intercepto** de una línea recta, comúnmente empleando el método de mínimos cuadrados. La pendiente de la recta indica el grado de sensibilidad del microsensor a un cambio de una unidad de medida del contaminante reportado por el equipo de referencia. El intercepto es una estimación del **sesgo** que presenta el microsensor, es decir, el valor que reporta cuando la concentración efectiva de referencia es igual a cero. El coeficiente de determinación R^2 ($0 \leq R^2 \leq 1$) que se obtiene durante la regresión lineal es una medida de qué tan bien se ajusta el modelo o ecuación obtenida a los datos, y por lo tanto es un indicador de la **linealidad** de éstos.

Otra medida de la idoneidad de un modelo de regresión es la raíz del error cuadrático medio (**RMSE**), que es una expresión del error o diferencia entre los valores predichos por el modelo de regresión encontrado y los valores realmente medidos por los equipos bajo calibración. Cuando se divide entre el rango de mediciones efectuadas o bien entre el promedio de las mismas, se dice que está **normalizada** (**nRMSE**). La normalización permite comparar el desempeño de regresiones obtenidas para distintos conjuntos de datos, o a escalas diferentes.

La ecuación resultante de una regresión lineal permite corregir la señal reportada por el microsensor con respecto de lo reportado por el equipo de referencia. Un aspecto importante a considerar es la transferibilidad de la ecuación de regresión, a circunstancias ambientales diferentes de las prevalecientes durante la calibración (Clements et al. 2017). Cuando se traslada el microsensor a un sitio donde existen condiciones distintas de presión, humedad, temperatura, nivel y tipo de contaminantes, la calibración puede perder validez, porque con frecuencia los sensores presentan respuestas no lineales y complejas a dichos factores ambientales (e.g. Kim et al., 2018, Arroyo et al., 2021). La extrapolación de los modelos de calibración representa un reto importante en el control de calidad de los datos reportados por redes de microsensors, ya que el costo de implementar un sistema de calibración para numerosos sensores puede exceder rápidamente al costo de adquisición de los equipos, anulando así la mayor de sus ventajas.

Al igual que la transferencia espacial de las ecuaciones de regresión, deben considerarse los cambios temporales en la sensibilidad y el sesgo, que representan una estimación del grado de **deriva** en la línea base de medición del sensor. La deriva puede originarse en el envejecimiento o degradación del elemento sensible (p.e. láseres o electrodos), o por la acumulación de polvo o humedad en filtros, tomas de aire o elementos ópticos. Abordar apropiadamente la acumulación de error por deriva implica realizar calibraciones periódicas, lo cual representa un obstáculo importante para el manejo de una red de microsensores.

Con el objetivo de abordar la no-linealidad y complejidad de la respuesta del microsensor a varios factores, algunos estudios han empleado **regresiones multivariadas, regresiones no-lineales** y algoritmos de **aprendizaje automático** (*machine learning*) como redes neurales y bosques aleatorios (e.g. Kim et al., 2018; Arroyo et al. 2021). Estos procedimientos pueden, potencialmente, generalizar el modelo de calibración del microsensor a diferentes ambientes, justamente porque toman en cuenta la influencia que diversos factores ejercen sobre la respuesta del microsensor. En cualquier caso es importante someter el microsensor a un rango lo más amplio posible de condiciones ambientales durante la calibración.

Evaluación de laboratorio

Las pruebas de laboratorio suelen preceder a las de campo, y consisten en exponer los microsensores a condiciones ambientales controladas en el interior de una cámara, donde pueden variarse los niveles de factores ambientales como temperatura, humedad, flujo de aire, la concentración del contaminante objetivo y la de especies químicas interferentes. El resultado que se obtiene es una curva o una superficie de respuesta del microsensor a los diferentes niveles del factor manipulado, así como el grado de reactividad cruzada a otros contaminantes. Las métricas antes descritas de repetibilidad, precisión, exactitud, sesgo y linealidad pueden ser estimadas en relación a cada uno de estos factores o a combinaciones de los mismos.

La evaluación de microsensores en laboratorio es costosa y por lo tanto raramente implementada. Su mayor ventaja consiste en que los sensores son expuestos a un rango de condiciones ambientales que difícilmente pueden capturarse en un corto periodo a la intemperie durante las evaluaciones de campo (Lewis et al. 2018). La determinación del límite superior de detección del contaminante objetivo se realiza habitualmente en condiciones de laboratorio y esto reviste particular importancia en previsión de condiciones de operación extremas, por ejemplo, la exposición de un microsensor de material particulado a los niveles de contaminantes prevalecientes durante un incendio.

2.2. Estudios previos

Experiencias en los lineamientos de evaluación alrededor del mundo

Los lineamientos de evaluación de los S μ S se han desarrollado para caracterizar su rendimiento utilizando pruebas de campo y pruebas de laboratorio. Con ello se informa al público en general de las ventajas y posibles limitaciones de estos. A continuación se describen algunos trabajos realizados por organizaciones, agencias y redes para proporcionar lineamientos de evaluación para los S μ S.

El Distrito de Gestión de la Calidad del Aire de la Costa Sur (SCAQMD-*South Coast Air Quality Management District*) de California, en los EUA, ha realizado trabajos pioneros en el desarrollo de herramientas y metodologías para la evaluación de S μ S a través del programa del Centro de Evaluación del Desempeño del Sensor de Calidad del Aire (**AQ-SPEC**-*Air Quality Sensor Performance Evaluation Center*). Su finalidad es evaluar el desempeño de los sensores de calidad de aire de “bajo costo” disponibles en el mercado. Realiza pruebas de campo siguiendo el método de referencia federal (FRM) y el método equivalente federal (FEM), evaluando por triplicado y durante un periodo de dos meses los S μ S para proporcionar una mejor información estadística del rendimiento general. Las pruebas de laboratorio se realizan en cámaras caracterizadas con condiciones ambientales controladas y concentraciones conocidas de partículas y contaminantes gaseosos (Polidori et al., 2017). Una recopilación de los resultados que se han obtenido en los últimos años se encuentra disponible en: <https://www.aqmd.gov/aq-spec/evaluations>.

La Red Europea sobre Nuevas Tecnologías de Detección para el Control de la Contaminación Atmosférica y la Sostenibilidad Medioambiental (**EuNetAir**-*European Network on New Sensing Technologies for Air-Pollution Control and Environmental Sustainability*) tiene por objetivo desarrollar nuevas tecnologías de detección para el control de la calidad del aire a escala integrada y multidisciplinaria mediante la investigación coordinada sobre nanomateriales, sistemas de sensores, modelado de la calidad del aire y métodos estandarizados para apoyar la sostenibilidad ambiental con un enfoque especial en las pequeñas y medianas empresas (EuNetAir, 2015).

En un ejercicio de 2014 de la EuNetAir se realizaron pruebas de campo de S μ S meteorológicos, de PM y de ambientes gaseosos (O₃, NO₂, CO y SO₂), determinando el rendimiento general de los S μ S en términos de sus métricas, con el objetivo de obtener datos con alta resolución espacial y temporal, así como apoyar los servicios de información relacionados con la calidad del aire y la calidad de vida. Los S μ S fueron evaluados frente a métodos estándar de referencia de calidad del aire a través de un estudio urbano experimental. Los diferentes S μ S que se instalaron junto con los analizadores de referencia se basan en contadores ópticos de partículas, sensores semiconductores de óxido metálico, sensores electroquímicos, sensores infrarrojos no dispersivos, detectores de fotoionización y sistemas que miden los recuentos de partículas según el principio de dispersión de la luz. De este estudio se reporta que los resultados de evaluación pueden variar bajo diferentes condiciones climáticas o por períodos más largos, sin embargo, los S μ S permiten mediciones de

la calidad del aire en una densidad espacial significativamente más alta de lo que era posible anteriormente solo con el equipo de referencia. (Borrego et al. 2016; Borrego et al. 2018).

AirParif es una organización independiente acreditada por el Ministerio de Medio Ambiente de París cuya misión es monitorear y proporcionar información sobre la calidad del aire en la región de París. La organización sigue el desarrollo tecnológico de los S μ S para evaluarlos y proporcionar a los usuarios potenciales (autoridades locales, agentes económicos, asociaciones, ciudadanos) una elección informada, puesto que no existen regulaciones para los S μ S (Léger, 2020). AirParif organiza de manera periódica a través de **AIRLAB** un reto de los microsensores (*the microsensor challenge project*), en el que además de evaluar el desempeño de las diferentes tecnologías de sensores, pone en consideración la utilidad, portabilidad y costos de operación de las diferentes plataformas disponibles en el mercado. El evento está enfocado en estimular que los fabricantes continúen mejorando y desarrollando sus dispositivos y a la vez mantener informado a los usuarios sobre los resultados de las evaluaciones.

Para la evaluación se consideran tres categorías: calidad del aire en exteriores, en interiores y de exposición personal. En la primera categoría los parámetros evaluados son el material particulado (PM₁, PM_{2.5} y PM₁₀), los óxidos de nitrógeno (NO y NO₂) y el ozono (O₃). En interiores se evalúan sensores que miden PM, CO₂, COV y NO_x mientras que en las mediciones móviles, solo se evalúan PM y NO_x. En el reto realizado en el año 2021, se presentaron 33 compañías participantes y los resultados se encuentran publicados en la página:

<http://www.airlab.solutions/en/projects/microsensor-challenge>.

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (**US EPA-United States Environmental Protection Agency**) realiza evaluaciones del rendimiento de S μ S, realizando pruebas de campo y pruebas de laboratorio. Proporciona al público en general tablas de resumen del rendimiento de sensores que se encuentran en el mercado. Informa que, si bien algunos de los S μ S tienen varias limitaciones que podrían incluir ocasionalmente datos objetables, es prioridad para la US EPA apoyar el desarrollo tecnológico hacia datos que sean de calidad conocida y ayudar a establecer prácticas óptimas para el uso de sensores y sus datos. Respecto a los S μ S que cumplen con los objetivos de calidad de datos de un proyecto específico, la US EPA los utiliza como un nuevo método de investigación exploratoria y monitoreo suplementario. La US EPA aporta recursos para realizar proyectos de monitoreo de la calidad del aire en su “Caja de herramientas de sensores de aire” (EPA, 2021a; EPA, 2021b).

En los siguientes párrafos se enuncian otras experiencias acerca de las evaluaciones de S μ S.

Para la detección de material particulado (PM) se han realizado estudios de laboratorio como el realizado por Manikonda et al. (2016) en el que evaluaron cuatro S μ S (Speck, Dylos, TSI AirAssure y UB AirSense) frente a instrumentos de referencia bien caracterizados. Los S μ S se caracterizaron en una cámara de laboratorio con condiciones estándar de temperatura y humedad relativa y con dos fuentes de PM que fueron humo de cigarrillo y polvo de prueba de Arizona. Este

estudio encontró que los S_μS probados funcionan con la precisión adecuada para monitorear la calidad del aire en un microambiente interior, no obstante sería necesario complementar la evaluación realizando pruebas de campo. Argumentan que la evaluación de los S_μS también incluye examinar la flexibilidad en los métodos de descarga de datos, la conectividad, la compatibilidad con las condiciones ambientales y la calidad del soporte técnico.

De la misma manera, en la evaluación de S_μS se investigan los modelos de calibración. Zimmerman et al. (2018) investigaron diferentes modelos de calibración para un paquete de sensores RAMP (Real-time Affordable Multi-Pollutant) que miden O₃, CO, NO₂ y CO₂, su investigación examinó tres métodos: 1) regresión lineal univariada de laboratorio, 2) regresión lineal múltiple empírica y 3) modelos de calibración basados en aprendizaje automático que utilizan bosques aleatorios. Revelan que solo los sensores calibrados por el tercer método cumplen con las recomendaciones de la US EPA sobre la calidad mínima de los datos en las mediciones de exposición personal. Concluyen que la combinación del tercer modelo de calibración con paquetes de sensores multi-contaminantes, parece ser un enfoque prometedor para abordar el bajo rendimiento que ha afectado a los S_μS.

3. Aplicaciones de los Sistemas de Microsensores

Existe una amplia variedad de aplicaciones vigentes y emergentes para los sistemas de microsensores. Algunas de ellas tienen requisitos específicos para la calidad de los datos, pero otras son más laxas. Actualmente no existe un consenso sobre los estándares de calidad de datos apropiados para muchas de las aplicaciones de los sistemas de sensores. La definición de los requerimientos de calidad para las diferentes aplicaciones es un trabajo en desarrollo entre la comunidad científica.

La US EPA en su Guía para los Sensores de Aire (Williams et al., 2014) ha definido cinco grupos de aplicaciones:

- I) *Información y educación*: aplicaciones educativas que utilizan los sistemas para la enseñanza, esta aplicación se centra en mediciones informativas que tienen el propósito de fomentar la conciencia sobre el problema de calidad del aire de una manera informal y cualitativa. Para este propósito es importante que el equipo sea consistente en el sentido de la medición (contaminación alta o baja).
- II) *Identificación y caracterización de puntos críticos*: pretende identificar fuentes locales de emisión a través de ubicaciones fijas y/o sistemas de sensores móviles para mapear los contaminantes. Un sesgo y precisión de $\pm 30\%$ es suficiente para este propósito.
- III) *Complemento de las redes de monitoreo*: el monitoreo suplementario o exploratorio se refiere al uso de sistemas de sensores para complementar una red existente de monitores de calidad del aire, incrementando la densidad espacial de la red con la colocación de

sensores fijos o móviles. Se considera que el sesgo y precisión no debe estar fuera del intervalo de $\pm 20\%$.

- IV) *Monitoreo de exposición personal*: abarca cualquier aplicación para monitorear la exposición de una persona a la contaminación del aire, principalmente para evaluar el impacto de la contaminación del aire en la salud o apoyar la investigación epidemiológica sobre los efectos de la contaminación. Un sesgo y precisión de $\pm 30\%$ es adecuado para este propósito
- V) *Monitoreo regulatorio*: se refiere al monitoreo con propósitos regulatorios en donde los equipos deben cumplir con los requerimientos para los Métodos de Referencia o Equivalente. El desempeño de los equipos debe cumplir con las estrictas recomendaciones regulatorias.

La OMM (WMO, 2021) utiliza una aproximación más exhaustiva basada en las necesidades de investigación y regulatorias, clasificando las aplicaciones en seis áreas en las cuales se requieren mediciones de la composición atmosférica y que actualmente operan con instrumentos de referencia. En algunas de estas aplicaciones ya se están empleando los sistemas de sensores, mientras que en otros existen áreas de oportunidad para estos sistemas. La tabla 3 resume estas las aplicaciones, así como el tipo de mediciones necesarias, los propósitos y usuarios.

Tabla 3. Clasificación de la Organización Meteorológica Mundial para las aplicaciones de los sistemas de sensores. En la tabla se describen el tipo de mediciones requeridas, el propósito de la medición y los principales usuarios.

Aplicación	Tipo de medición, propósito y usuario		Mediciones requeridas
Investigación en ciencias atmosféricas	Tipo	Observaciones a corto y largo plazo de la composición atmosférica	<ul style="list-style-type: none"> ● Específico a un compuesto, generalmente necesita mediciones cuantitativas y tratamiento estadístico de los datos. ● Trazable a materiales/métodos de referencia identificables, cuando sea posible. ● Reportadas como concentraciones con su valor de incertidumbre. ● Verificación externa de la calidad de los datos y los métodos de medición a través de una extensa revisión por pares <p><i>Los sistemas de sensores están comenzando a desempeñar un papel en áreas como la validación de modelos o emisiones y la variabilidad espacial de la contaminación.</i></p>
	Propósito	Investigación básica y aplicada	
	Usuario	Principalmente organizaciones/ institutos de investigación y universidades	
Cambio global a largo plazo	Tipo	Tendencias y comportamiento de los principales parámetros de composición atmosférica.	<ul style="list-style-type: none"> ● Mediciones cuantitativas y reproducibles ● Los métodos siguen métodos prescriptivos / mejores prácticas. ● Datos de alta calidad y exactitud. ● Compatibilidad de los datos de concentración entre operadores/ubicaciones/naciones ● Participación en protocolos de calibración internacionales. ● Adopción de métodos solo después de una extensa evaluación técnica y por pares del desempeño analítico <p><i>Los sistemas de sensores han comenzado a desempeñar un papel proporcionando información complementaria a los sistemas de referencia bien establecidos.</i></p>
	Propósito	Realice un seguimiento del cambio global, apoye actividades internacionales como la UNFCC, el GCOS, la WMO/GAW y las convenciones ambientales.	
	Usuario	Principalmente organizaciones de investigación, institutos, organismos gubernamentales, agencias meteorológicas	

Aplicación	Tipo de medición, propósito y usuario		Mediciones requeridas
Gestión de la calidad del aire	Tipo	Observación de las concentraciones de los contaminantes del aire.	<ul style="list-style-type: none"> ● Compatibilidad con los estándares de calidad del aire. ● Grado sustancial de confianza en los datos ya que forman parte de la toma de decisiones. ● Mediciones cuantitativas o cualitativas para capturar líneas base, tendencias y otros cambios en las concentraciones de los contaminantes. ● Cierta grado de calidad y de confiabilidad en los datos. <p><i>Esta es ya una de las primeras áreas de aplicación de los sistemas de sensores.</i></p>
	Propósito	Autoridades operativas de transporte, oficinas gubernamentales locales y agencias ambientales	
	Usuario	Tomadores de decisiones a nivel local o regional, por ejemplo, en la planificación del transporte o el control de emisiones	
Cumplimiento/regulación de calidad del aire	Tipo	Observación de las concentraciones de los contaminantes del aire.	<ul style="list-style-type: none"> ● Mediciones cuantitativas. ● Datos de alta calidad con trazabilidad a materiales/métodos de referencia para la presentación de informes jurídicos. ● Reportado como concentraciones. ● Seguir los métodos prescritos y las mejores prácticas. ● Instrumentos certificados en base a la demostración de equivalencia de medición. ● Seguir los protocolos nacionales para la calibración y las metodologías que cumplan con los objetivos de calidad de datos existentes legalmente definidos. <p><i>Es poco probable que se adopten sistemas de sensores para estas aplicaciones a menos que se desarrollen protocolos estandarizados para calibración, operación y uso de datos.</i></p>
	Propósito	Demostración de que una ubicación ha cumplido con los estándares nacionales o transnacionales (por ejemplo, de la Unión Europea) para la calidad del aire	
	Usuario	Principalmente organismos operativos, contratistas comerciales, agencias ambientales.	
Información pública /	Tipo	Observaciones de parámetros de contaminación del aire	

Aplicación	Tipo de medición, propósito y usuario		Mediciones requeridas
monitoreo comunitario	Propósito	Apoyar la participación y la conciencia pública, las actividades de ciencia ciudadana, la educación, proporcionar datos para la promoción y el empoderamiento local.	<ul style="list-style-type: none"> ● Mediciones cuantitativas o cualitativas. ● Flexibilidad en unidades reportadas. ● Indicativo. ● Métodos no prescritos legalmente, pero deben evitar conflictos con los datos de calidad del aire generados a partir de aplicaciones de cumplimiento/normativas <p><i>Identificado como una clase de aplicaciones para sistemas de sensores.</i></p>
	Usuario	Organismos operativos, ONGs, investigadores académicos, empresas o particulares	
Proxy para la exposición	Tipo	Mediciones alternativas de exposición que se pueden comparar con los datos oficiales o, en ausencia de datos oficiales, pueden proporcionar algún orden de magnitud de la exposición de una población en áreas o edificios específicos.	<ul style="list-style-type: none"> ● Mediciones cuantitativas. ● Se prefiere la equivalencia de medición con las observaciones regulatorias, pero no se requiere. ● Cuando se usen para apoyar la toma de decisiones médicas/de salud, los requisitos de calidad de los datos serían más rigurosos. <p><i>Una aplicación emergente en la que los sistemas de sensores ya están desplazando al muestreo pasivo de baja resolución temporal.</i></p>
	Propósito	Observaciones de exposición personal a la contaminación del aire.	
	Usuario	Investigadores académicos, agencias operativas, funcionarios de salud pública, etc. que evalúan los impactos de la contaminación del aire en la salud humana	

Las aplicaciones comprenden desde actividades de investigación hasta proyectos de difusión y ciencia ciudadana. Cada aplicación tendrá necesidades particulares de calidad de datos. Aún no existe un acuerdo común sobre los estándares de calidad de datos necesarios para cada aplicación, así como la infraestructura adicional que será necesaria para la operación de los sistemas de sensores y las herramientas de apoyo.

4. Discusión

Resulta indudable el hecho de que los S μ S tienen potencial para el desarrollo de aplicaciones de gran interés para las autoridades ambientales y ampliar el conocimiento sobre la calidad del aire local. Por ejemplo, pueden aumentar las capacidades de las redes de monitoreo regulatorias permitiendo la instalación de redes densas y extensas que incrementen significativamente la resolución tanto espacial como temporal del monitoreo a una fracción del costo que implicaría el uso de equipo grado regulatorio. Otros usos potenciales incluyen su empleo en el monitoreo perimetral de obras de construcción, la evaluación de las intervenciones gubernamentales, el monitoreo de puntos críticos de contaminación (*hot-spots*) y el rápido despliegue durante incendios o desastres.

Sin embargo, los S μ S aún no son capaces de proporcionar datos con la calidad suficiente para la toma de decisiones. Para que estos dispositivos adquieran mayor confiabilidad, requieren de un instrumento de referencia para que los datos sean verificados con regularidad, pero aún no con un nivel de calidad que pudiera considerarse equivalente al de los equipos regulatorios. Es necesario desarrollar y aplicar metodologías robustas para evaluar periódicamente su desempeño en las diferentes condiciones que predominan en la heterogeneidad del ambiente urbano, así como identificar las principales desviaciones e interferencias y proponer métodos adecuados para su compensación. La comparación con los equipos de referencia durante periodos de tiempo cortos, no es suficiente para garantizar que los S μ S funcionen consistentemente en condiciones ambientales variables y durante largos periodos de tiempo. Ante este escenario, resulta obvio que el primer paso para la incorporación de las tecnologías basadas en microsensores es considerar un esfuerzo adicional en la verificación de los datos y los costos asociados a estas actividades para asegurar la calidad de los datos.

Las autoridades ambientales son responsables de generar datos confiables, defendibles y auditables de la calidad del aire. El monitoreo de la calidad del aire está enmarcado por regulaciones, normas y estándares. Los datos deben ser confiables para la evaluación de los estándares de calidad del aire, la protección de la salud pública y el diseño de políticas de control de la contaminación. Deben ser defendibles en caso de que sean requeridos en procesos administrativos y judiciales. Deben ser auditables para garantizar el uso eficiente de los recursos públicos y con propósitos de trazabilidad. Por lo tanto, las autoridades ambientales deben ser cautas al incorporar los S μ S en sus programas de vigilancia.

La comunidad científica, sin embargo, se encuentra entre el optimismo del beneficio de contar con instrumentos económicos que pueden emplearse en una gran variedad de aplicaciones de interés científico, y el pesimismo de una calidad deficiente en los datos. Cada vez es más frecuente encontrar trabajos de investigación e inclusive estudiantiles enfocados en el desarrollo de dispositivos basados en sensores de bajo costo para aplicaciones diversas, lo cual desde el punto de vista docente y de aprendizaje, ofrece muchos beneficios y oportunidades.

Es importante reconocer que las autoridades regulatorias y ambientales en México no cuentan con la disponibilidad de recursos y de personal suficientes para el desarrollo de metodologías basadas en S μ S, considerando las actividades de evaluación del desempeño en diferentes aplicaciones y microambientes, así como adoptando las mejores prácticas tanto en su operación como en el manejo de los datos. Esto deja un nicho de oportunidad para la comunidad científica que puede ser un facilitador para mejorar el conocimiento sobre estos dispositivos, fomentando proyectos de evaluación y el intercambio de conocimientos entre las ciencias atmosféricas, la ciencia de datos y la comunidad regulatoria. El desarrollo de metodologías y de herramientas para la gestión de datos, algoritmos de corrección e identificación de interferencias es indispensable.

Algunos aspectos que requieren de atención técnica especializada y que pudieran ser abordados a través de investigaciones específicas incluyen:

- 1) Conocer el tiempo de degradación de la respuesta del sensor en condiciones reales de operación según la aplicación, la duración o validez de una calibración en función del tiempo y de las condiciones ambientales.
- 2) Identificar las interferencias de otros contaminantes presentes en el aire o de las condiciones meteorológicas.
- 3) Conocer la deriva de la respuesta en diferentes tipos de aplicaciones.
- 4) Desarrollar métricas de desempeño.
- 5) Desarrollar métodos de calibración.
- 6) Elaborar normas para la evaluación del desempeño.
- 7) Generar recomendaciones para la validación y ajuste de los datos.
- 8) Generar manuales para el uso de los S μ S en diferentes aplicaciones.
- 9) Crear *hubs* para el intercambio de datos e información.
- 10) Facilitar el acceso a recursos informáticos para el almacenamiento de los datos.
- 11) Desarrollar herramientas de visualización y explotación de los datos.

Como ya se ha mencionado, otro aspecto que no debe soslayarse en un proyecto que pretenda utilizar dispositivos de bajo costo, son los costos operacionales derivados de la instalación, logística, calibración periódica, la transmisión y almacenamiento de los datos, la gestión de datos, el uso de recursos informáticos para el despliegue y visualización de los datos, el mantenimiento preventivo y la reparación del sensor u otro equipo o dispositivo auxiliar. En términos generales, los costos de operación de una red de sensores de bajo costo pueden acercarse a los costos de operación de una red modesta de tipo regulatorio. El anexo 3 del documento *An update on low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition* de la OMM presenta un ejemplo detallado de los costos de operación de una red de monitoreo basada en sensores de bajo costo.

En resumen, las consideraciones y aspectos descritos en este documento advierten de las precauciones que se deben tomar en el uso de los S μ S, pero también de su enorme potencial para diversas aplicaciones. Resulta imperante que se desarrolle una normativa en nuestro país basado en procedimientos de buenas prácticas para el uso de estos dispositivos, tomando en cuenta que la información que puedan proveer es por lo pronto indicativa de las condiciones de la contaminación

en los diferentes entornos en las que se desplieguen y por lo tanto deben de ser contempladas como complemento, más no un reemplazo de los instrumentos de grado regulatorio.

5. Referencias

AIRLAB (2021). *AIRLAB Microsensor CHALLENGE 2021 Protocol*. Disponible en: <http://www.airlab.solutions/en/projects/microsensor-challenge>

Arroyo, P., Gómez-Suárez, J.I, Lozano, J. (2021) Low-Cost Air Quality Measurement System Based on Electrochemical and PM Sensors with cloud connection. *Sensors*, 21, 6228. <https://doi.org/10.3390/s21186228>

Arzoumanian, E., Vogel, F. R., Bastos, A., Gaynullin, B., Laurent, O., Ramonet, M., and Ciais, P. (2019). Characterization of a commercial lower-cost medium-precision non-dispersive infrared sensor for atmospheric CO₂ monitoring in urban areas. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12, 2665–2677. <https://doi.org/10.5194/amt-12-2665-2019>.

Bohren, C. F., and D. R. Huffman. (2004). *Absorption and scattering of light by small particles*. Wiley. ISBN: 978-0-471-29340-8.

Borrego, C., Costa, A. M., Ginja, J., Amorim, M., Coutinho, M., Karatzas, K., Sioumis, T., Katsifarakis, N., Konstantinidis, K., De Vito, S., Esposito, E., Smith, P., André, N., Gérard, P., Francis, L. A., Castell, N., Schneider, P., Viana, M., Minguillón, M. C., ... Penza, M. (2016). Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise. *Atmospheric Environment*, 147(2), 246–263. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.050>

Borrego, C., Ginja, J., Coutinho, M., Ribeiro, C., Karatzas, K., Sioumis, T., Katsifarakis, N., Konstantinidis, K., De Vito, S., Esposito, E. and Salvato, M. (2018). Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir Joint Exercise–Part II. *Atmospheric environment*, 193, pp.127-142.

Castell, N., Dauge, F.R., Schneider, P., Vogt, M., Lerner, U., Fishbain, B., Broday, D. and Bartonova, A. (2017). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?. *Environment international*, 99, pp.293-302.

Chan, K., Schillereff, D.N., Baas, A.C., Chadwick, M.A., Main, B., Mulligan, M., O’Shea, F.T., Pearce, R., Smith, T.E., Van Soesbergen, A. and Tebbs, E. (2021). Low-cost electronic sensors for environmental research: Pitfalls and opportunities. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 45(3), pp.305-338.

Clements, A.L., Griswold, W.G., Rs, A., Johnston, J.E., Herting, M.M., Thorson, J., Collier-Oxandale, A. and Hannigan, M. (2017). Low-cost air quality monitoring tools: from research to practice (a workshop summary). *Sensors*, 17(11), p.2478.

Crilley, L.R., Singh, A., Kramer, L.J., Shaw, M.D., Alam, M.S., Apte, J.S., Bloss, W.J., Hildebrandt Ruiz, L., Fu, P., Fu, W. and Gani, S. (2020). Effect of aerosol composition on the performance of low-cost optical particle counter correction factors. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(3), pp.1181-1193.

DHS Saver. (2013). Handheld Photoionization Detectors Market Survey Report. U.S. Department of Homeland Security, System Assessment and Validation for Emergency Responders. Reporte preparado por National Security Technologies LLC. Disponible en: <https://www.dhs.gov/publication/handheld-photoionization-detectors>

Duvall, R. M., Hagler, G. S. W., Clements, A. L., Benedict, K., Barkjohn, K., Kilaru, V., ... & Snyder, J. L. (2021). Deliberating Performance Targets: Follow-on workshop discussing PM₁₀, NO₂, CO, and SO₂ air sensor targets. *Atmospheric Environment*, 246, 118099.

EPA (2021a) Preguntas frecuentes acerca de los sensores de aire. Disponible en: <https://espanol.epa.gov/espanol/preguntas-frecuentes-acerca-de-los-sensores-de-aire>

EPA (2021b) Caja de herramientas de sensores de aire. Disponible en: <https://espanol.epa.gov/espanol/caja-de-herramientas-de-sensores-de-aire>

EuNetAir. (2015). *European Network on New Sensing Technologies for Air-Pollution Control and Environmental Sustainability*. Disponible en: <http://www.eunetair.it/>

Ferdoush, S. & Li, X. (2014) Wireless sensor network system design using Raspberry Pi and Arduino for environmental monitoring applications. *Procedia Computer Science* 34: 103–110.

Hinds, W. C. (2012) *Aerosol technology: Properties, behavior, and measurement of airborne particles*. Wiley. ISBN: 978-0-471-19410-1.

Jayaratne, R., Liu, X., Thai, P., Dunbabin, M. and Morawska, L. (2018). The influence of humidity on the performance of a low-cost air particle mass sensor and the effect of atmospheric fog. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(8), pp.4883-4890.

Karagulian, F., Barbieri, M., Kotsev, A., Spinelle, L., Gerboles, M., Lagler, F., Redon, N., Crunaire, S. and Borowiak, A. (2019a). Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. *Atmosphere*, 10(9), p.506.

Karagulian, F., Gerboles, M., Barbieri, M., Kotsev, A., Lagler, F., Borowiak, A. (2019b) Review of sensors for air quality monitoring, EUR 29826 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-09255-1, doi:10.2760/568261, JRC116534.

- Kaduwela, A. and Wexler, A. (2021). Use of low-cost air sensors to augment regulatory networks. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 71(6), pp.680-681.
- Keimel, A. (2019). Comparison of Low-Cost CO₂ Non-Dispersive Infrared (NDIR) Sensors for Ambient Greenhouse Gas Monitoring. UVM Honors College Senior Theses. 282. Disponible en: <https://scholarworks.uvm.edu/hcoltheses/282>
- Kim, J., Shusterman, A. A., Lieschke, K. J., Newman, C., Cohen, R. C. (2018). The BERkeley Atmospheric CO₂ Observation Network: field calibration and evaluation of low-cost air quality sensors. *Atmospheric Measurement Techniques*. 11, 1937–1946. <https://doi.org/10.5194/amt-11-1937-2018>, 2018.
- Léger, K. (2020). Monitor, inform, understand, innovate: The role of airparif, a non-profit organization accredited by France's ministry of the environment to monitor air quality. *Field Actions Science Reports*. 21, 36-39. <http://journals.openedition.org/factsreports/6064>
- Lewis, A. & Edwards, P. (2016) Validate personal air pollution sensors. *Nature News* 535(7610): 29.
- Lewis, A.C., von Schneidmesser, E., Peltier, R.E., (2018). Low-cost Sensors for the Measurement of Atmospheric Composition: Overview of Topic and Future Applications. World Meteorological Organization, WMO-No. 1215, Geneva, Switzerland.
- Manikonda, A., Ziková, N., Hopke, P., Ferro, A. (2016). Laboratory assessment of low-cost PM monitors. *Journal of Aerosol Science* 102, 29-40. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2016.08.010>
- Morawska, L., Thai, P.K., Liu, X., Asumadu-Sakyi, A., Ayoko, G., Bartonova, A., Bedini, A., Chai, F., Christensen, B., Dunbabin, M. and Gao, J. (2018). Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone?. *Environment international*, 116, pp.286-299.
- Polidori, A., Papapostolou, V., Feenstra, B., Zhang, H. (2017). Field Evaluation of Low-Cost Air Quality Sensors. South Coast Air Quality Management District. Disponible en: <http://www.aqmd.gov/aq-spec/evaluations/field>
- Salimifard, P., Rim, D. and Freihaut, J.D. (2020). Evaluation of low-cost optical particle counters for monitoring individual indoor aerosol sources. *Aerosol Science and Technology*, 54(2), pp.217-231.
- Spinelle, L., Gerboles, M., Kok, G., Sauerwald, T. (2015). Review of low-cost sensors for the ambient air monitoring of benzene and other volatile organic compounds. EUR 27713. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union. JRC98368.
- Stetter, J. R., & Li, J. (2008). Amperometric gas sensors a review. *Chemical reviews*, 108(2), 352-366.

Szczurek, A. (2011). *Methods and measuring techniques of air pollutants*. Wrocław University of Technology.

Torvela, H. (2013). *Measurement of atmospheric emissions*. Springer Science & Business Media.

Williams, R., Kilaru, V., Snyder, E., Kaufman, A., Dye, T., Rutter, A., Russell, A. and Hafner, H., (2014). *Air sensor guidebook*. US Environmental Protection Agency.

Williams, R., Nash, D., Hagler, G., Benedict, K., MacGregor, I., Seay, B., Lawrence, M., Dye, T., (2018). *Peer Review and Supporting Literature Review of Air Sensor Technology Performance Targets*. EPA/600/R-18/324 Disponible en: [https:// www.epa.gov/air-sensor-toolbox](https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox).

WMO, World Meteorological Organization. (2021). *An Update on Low-cost Sensors for the Measurement of Atmospheric Composition, December 2020*. Edited by R. Pelttier. Geneva 2, Switzerland. Disponible en: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10620

Zimmerman, N., Presto, A. A., Kumar, S. P. N., Gu, J., Hauryliuk, A., Robinson, E. S., Robinson, A. L., & Subramanian, R. (2018). A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(1), 291–313. <https://doi.org/10.5194/amt-11-291-2018>